

불규칙 지형을 고려한 2차원 유한요소 탄성파 모델링

이종하¹⁾ · 서정희¹⁾ · 신창수¹⁾

2 Dimensional FEM Elastic Wave Modeling Considering Surface Topography

Jong Ha Lee¹⁾, Jung Hee Suh¹⁾ and Chang Soo Shin¹⁾

요 약 : 종래의 탄성파 모델링은 지표를 수평면으로 가정하고 그 아래쪽에 여러 개의 반사면에 대한 모델링이 대부분 이었다. 그러나, 실제 탐사에서는 복잡한 지형을 가진 지표에서 탐사가 수행되기 때문에 탄성 매질에서의 반응을 명확하게 구분해 내는 것이 힘들다. 지표에 탄성파 전파특성을 규명하기 위하여 모델에 지형을 고려할 수 있도록 하여 시간영 역 유한요소법을 이용하여 매질의 반응을 구하였다. 이러한 이러한 알고리즘을 이용하여 지표에서 전원을 기했을 때 수평 및 제방(mound), 채널(channel) 등의 구조로부터 지표의 수신기에서 합성 탄성파 기록을 관찰하고, 스냅샷(snapshot)을 얻어냄으로써 해석해와 잘 일치함을 확인하였고, 지표 및 지하 반사면에 의한 복잡한 탄성파의 전파 양상을 파악할 수 있었다. 불규칙 지표면을 따라 전파하는 표면파가 모서리에서 새로운 진원으로 작용하여 큰 잡음이 생성됨을 관찰하였고, 지표를 따라 전파하는 높은 에너지의 레일리파, 상대적으로 낮은 압축파, 전단파 등의 전파 양상으로부터 파의 천이 상태를 관찰할 수 있었다.

주요어 : 불규칙 지표, 유한요소법, 탄성파, 파동방정식, 모델링, 레일리파

Abstract : Forward modeling by construction of synthetic data is usually practiced in a horizontal surface and a few subsurface structures. However, in-situ surveys often take place in such topographic changes that the corrupted field data always make it difficult to interpret the right signals. To examine the propagation characteristic of elastic waves on the irregular surface, a general mesh generation code for finite element method was modified to consider the topography. By implementing this algorithm, the time domain modeling was practiced in some models with surface topography such as mound, channel, etc. The synthetic data obtained by receivers placed on surface also agreed with the analytic solution. The snapshots showing the total wave-field revealed the propagation characteristic of the elastic waves through complex subsurface structures and helped to identify the signals on the time traces. The transmission of Rayleigh waves along the surface, compressive waves, and sheer waves was observed. Moreover, it turned out that the Rayleigh waves behave like a new source at the edge.

서 론

탄성파 모델링은 임의의 지하 구조의 모델에 대한 모델 반응을 미리 고찰하여 봄으로써 현장 탄성파 탐사 계획 수립에 도움을 주거나, 현장에서 취득된 자료의 해석시 이를 실제 자료와 비교함으로써 해석에 도움을 주기 위한 방법으로 많이 활용되어 왔다. 그러나, 종래의 탄성파 모델링은 주로 평평한 지표 지형에 대하여 음향파 만을 모델링하는데 그쳐, 실제 육상 탄성파 탐사에서 얻어지는 불규칙한 지표 및 탄성 매질의 자료를 해석하는데 큰 도움이 되지 못했다. 따라서, 본 연구에서는 불규칙한 지표 지형이 존재하는 경우 탄성 매질 내의 탄성파 전파를 모델링 함으로써 육상 탄성파 자료 해석에 도움을 주고자 하였다.

탄성파 모델링 방법에는 유한 차분법, 유한 요소법 등이 가장 많이 이용되고 있다. 유한 차분법은 Alterman과 Karal(1968) 이후 많은 발전을 가져와 Madariaga(1976)의 Staggered Grid, Dablain(1986)의 고차 유한 차분법 등으로 발전하였으며 아직 많은 수치 해석학적인 문제에 적용이 되고 있다. 또한, 유한 요소법은 Lysmer와 Drake(1972)의 표면파에 대한 적용 이후 Marfurt(1984)에 의한 탄성파 모델링 등 많은 발전을 이루었다. 유한 차분법은 계산 시간이 적게 드는 장점이 있으나, 복잡한 경계면 등의 처리가 어려운 단점이 있어 이러한 단점을 극복하기 위하여 Staggered Grid 등 여러 대안들이 대두되었다. 유한 요소법은 다양한 모양의 요소를 이용할 수 있으므로 복잡한 경계면 등의 처리는 비교적 용이하나 계산 시간이나 기억용량을 많이 필요로 하는 단점을 가지고 있다. 최근에는 이

*2001년 2월 2일 접수

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부

러한 단점을 극복하기 위하여 경계면에 유한 요소법을 사용하고 내부에서는 유한 차분법을 사용하는 혼성법 등도 발전하였으나, 모델의 변화에 따른 적용성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 2차원의 불규칙한 지표면 및 불균질 매질을 효과적으로 모델링할 수 있는 격자를 생성한 후, 다양한 요소를 이용하여 복잡한 경계면 처리 등에는 용이하나 계산 시간, 기억 용량의 한계로 인하여 꺼려져 온 유한 요소법을 이용하여 고속, 고용량의 컴퓨터로 시간 영역 모델링을 수행하였다. 충분히 조밀한 격자 간격을 사용하여 천부 지층에서의 탄성파의 전파와 그 거동을 정밀하게 모델링하였으며, 각 시간 대별로 스냅샷(snapshot)을 구함으로써 P파, S파, 퀘일리파 등의 전파 양상을 관찰해 보았다.

본 문

2차원 탄성 파동 방정식

3차원 직각 좌표계에서 파동방정식은 균질, 동방성 매질에서 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{U}) - \mu\nabla \times \nabla \times \mathbf{U} - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{U}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$ 는 각각 x, y, z 방향의 변위를 나타내는 벡터

이며, ρ, λ, μ 는 각각 매질의 밀도 및 Lamé 상수들이다.

식 (1)을 전개한 후, y 방향의 변화를 무시하면, 2개의 x, z 방향의 변위, 즉 P파와 SV파의 거동이 결합된 다음과 같은식을 얻을 수 있다(Kelly et al., 1976).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} \right)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} \right)$$

이 식에 진원항을 포함하고 정리하여, 다음과 같은 2차원 파동방정식을 얻을 수 있으며,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \alpha^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial z} + f_x \\ \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \beta^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \alpha^2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (\alpha^2 - \beta^2) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial z} + f_z \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\alpha = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}$, $\beta = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$ 이며, 각각 매질 내에서의 P파 속도, S파 속도이다.

유한 요소 방정식

임의의 2차원 요소에 대하여 선형 내삽 함수를 이용하여 요소의 각 격자점의 변위를 표현할 수 있으며, 변분법을 이용하면 식 (2)의 파동 방정식을 다음과 같은 시간 영역 유한 요소 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{U}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

여기서, \mathbf{M} 은 질량행렬, \mathbf{K} 는 강성행렬을 나타내며, \mathbf{U} 는 자유도가 2인 각 격자점의 변위를 나타낸다. 변분법을 통한 유한 요소 방정식의 유도 과정과 본 연구에서 사용된 삼각형, 사각형 요소에 대한 질량 행렬 및 강성행렬을 구하는 과정은 과거의 연구자들에 의해 많이 다루어져 왔으므로 본 논문에서는 생략하였다.

식 (3)을 정리하고 좌변의 시간에 대한 2차 미분항을 중앙 유한 차분식으로 전개한 후 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{U}(t + \Delta t) = 2\mathbf{U}(t) - \mathbf{U}(t - \Delta t) + \Delta t^2 \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{K}\mathbf{U}(t) + \mathbf{F}(t)) \quad (4)$$

시간영역에서의 해는 식 (4)를 이용하여 시간 적분을 수행해 나감으로써 구할 수 있다. 본 연구에서는 삼각형 및 사각형 요소를 사용하여 질량행렬 및 강성행렬을 구하였는데 식 (4)에서의 질량 행렬은 계산 속도 및 계산의 편의를 위하여 Lumped 질량 행렬을 사용하여 해를 구하였다.

격자 생성

격자 생성 과정은 본 연구에서 핵심이 되는 부분이다. 탄성파 모델링을 위한 격자 생성 알고리즘은 이미 기존에 작성되어 있었으나, 이는 대부분 평평한 지표 지형을 가정한 경우로 써 이를 본 연구의 목적에 맞게 적절히 수정하였다.

불규칙한 지표의 지형을 구현하기 위해서는 여러 가지 방법을 생각해 볼 수 있다. 먼저, 직사각형의 영역에 대한 격자를 작성한 후 각 좌표에 대한 일차 변환을 통하여 원하는 지형을 만들어내는 방법이 있으나 이 경우 모델 변화에 적용이 번거롭고, 요소의 크기가 변형되었을 때 안정조건을 충족시켜 주어야 하는 단점이 있다. 본 논문에서 구현한 방법은 기존의 격자 생성 알고리즘으로 2층 이상의 격자를 만든 이후 1층에 해당하는 요소를 제거함으로써 1층과 2층의 경계에서 원하는 지표 지형을 얻는 방법을 이용하였다. 이 경우 2층의 하부에 있는 격자에 새로운 격자 번호를 지정하고, 각 요소와 관련된 격자를 찾아 그 좌표와 요소의 물성 매개 변수를 저장하여야 한다.

Fig. 1은 본 연구에서 구현한 불규칙 지표 지형을 가진 모델에 대한 격자 생성과정의 모식도를 나타낸다. 전체 요소에 대한 강성 행렬, 질량 행렬을 조립할 때 Fig. 1의 (a)와 같이 한 방향으로의 격자수가 동일할 경우 일정한 띠를 가진 행렬이 되나, Fig. 1의 (b)와 같이 1층이 제거된 모델의 경우 산재된 행렬을 이루는 단점이 있다. 따라서, 전술한 바와 같이 이러한 행

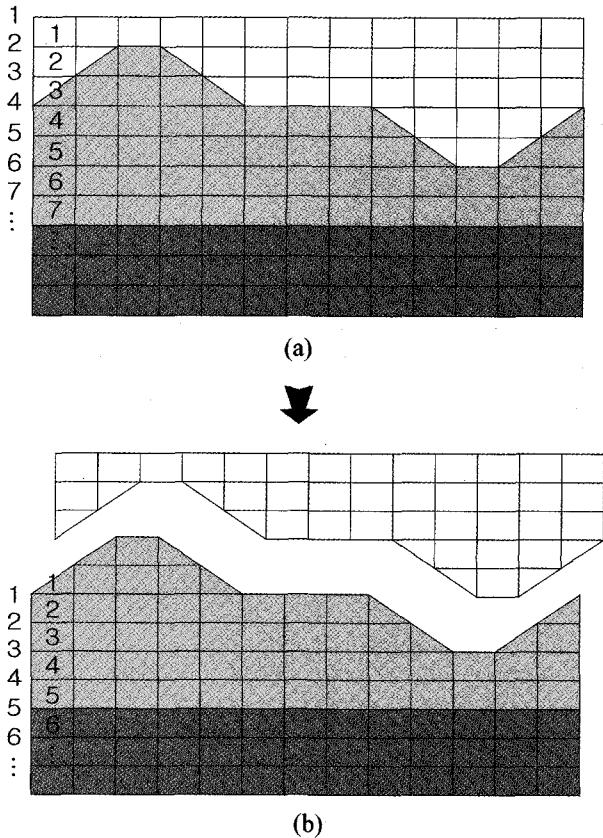


Fig. 1. A schematic diagram of mesh generation for an irregular topography.

렬을 푸는 번거로움을 생략하기 위해 Lumped 질량 행렬을 사용하게 되었다.

안정 조건 및 분산 관계

식 (4)의 시간 적분시 오차의 누적으로 인하여 발산이 일어날 수 있다. 해의 안정을 유지하기 위해 매질의 물성, 격자 간격 및 시간 적분 시의 시간 간격 등을 고려해 주어야만 한다. 음향 파동방정식의 경우 유한 요소법의 안정 조건은 Lumped 질량 행렬을 사용할 때 다음과 같으나(Marfurt, 1984),

$$p = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (5)$$

이러한, 기준은 $\Delta x = \Delta z$ 인 정사각형 요소에 대한 음향 파동방정식의 안정 조건이므로 탄성 파동 방정식에 삼각형과 사각형 요소를 혼합하여 사용한 본 논문의 경우와 정확히 부합하지는 않는다. 따라서, 본 논문에서는 이보다 작은 $p=0.7$ 로 정하여 적절한 안정 조건 하에 모델링하였다. 또한, 격자의 간격에 따라 파의 수치적인 위상속도 및 군속도가 변하므로 격자 분산 관계를 고려하여야만 한다. Lumped 질량 행렬을 사용한 시간 영역 탄성 파동 방정식의 경우, 위상 속도의 오차를 1퍼센트 이내로 유지하기 위해 필요한 파장당 격자수 $G_s = (\lambda_s / \Delta)$ 는 13 이상이다(신창수 외, 1993). 따라서, 본 연구에서는 파장 당 격자수를 14로 정하여 격자에 의한 파의 분산을 최대한 배제하였다.

경계 조건

2차원 파동방정식의 수치 모델링 시 지표를 제외한 나머지 세 경계부분에서 반사파 이벤트가 발생하게 된다. 실제 파동방정식의 전파에서는 의도하지 않은 것으로 새로운 자유면을 만난 것과 같은 효과를 나타내게 된다. 이러한 효과를 제거하기 위해 개발된 기법에는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 구현하기가 비교적 용이한 스펜지 경계 조건을 사용하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 모델의 가장자리에 적절한 크기의 감쇄

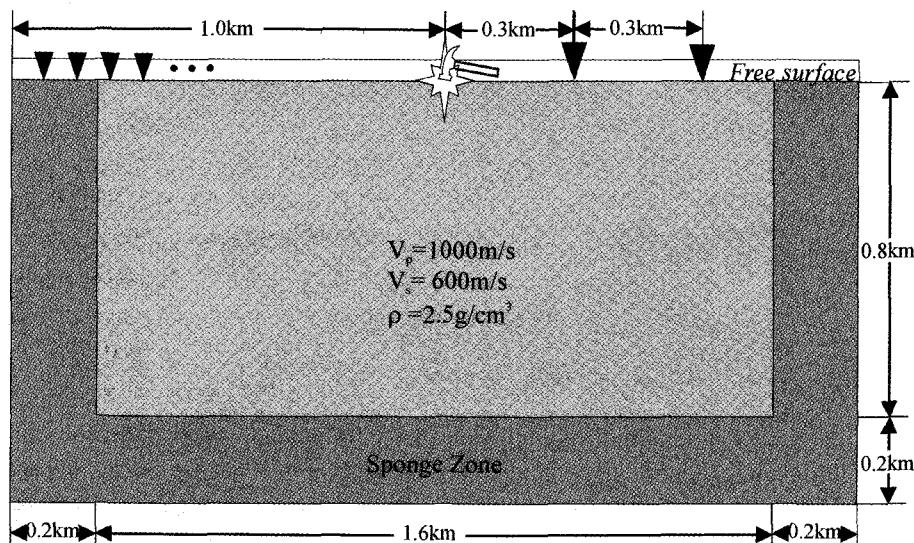


Fig. 2. Model I: Homogeneous half-space model without any topography.

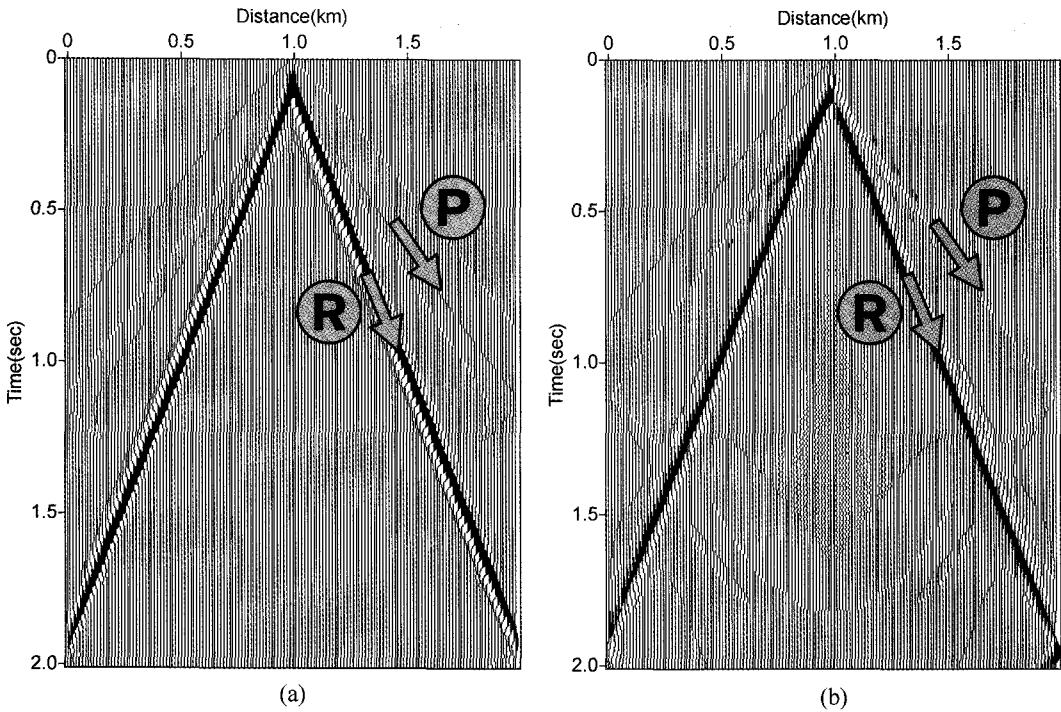


Fig. 3. The synthetic seismogram of Model I: for (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement.

대를 설정한 뒤 매 시간마다 각 방향의 감쇄대부터 모델의 경계까지의 변위 값에 1부터 0.98까지의 선형적인 가중 계수를 곱하여 효과적으로 감쇄되는 효과를 얻을 수 있었다(Shin, 1995).

모델반응

위의 과정을 통하여 구현된 알고리즘으로 다양한 모델에 대한 반응을 고찰하여 보았는데, 먼저 수치 모델링의 타당성 검증을 위하여 평면 모델을 사용하였고, 다음으로 대표적인 불규칙 지표 지형으로 볼 수 있는 제방, 채널의 모델을 사용하여 모델링 해 보았으며, 마지막으로 불규칙 지표 지형 하부에 2층을 가진 모델에 대하여 각각 모델링을 실시하여 결과를 고찰하여 보았다.

Model I: 반무한 평면 모델

본 연구에서 구현한 불규칙한 지표면에 대한 탄성 파동방정식의 수치 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 평면 모델을 설정하고 모델링을 실시한 후 임의의 지점에서 얻은 해와 해석해를 비교하여 보았다.

Fig. 2는 모델링에 사용된 규칙 반무한 평면 모델을 나타내며, 윗 부분에 50 m의 공기 층을 두었으며, 이 부분은 격자 생성 후 다시 격자 번호를 붙일 때 제거되는 부분이다. 하부의 1층의 크기는 2000 m × 1000 m이다. 1층의 매개 변수는 P파 속도 α 가 1000 m/sec, S파 속도 β 는 600 m/sec이며 즉, 프와 송비는 약 0.218이며, 밀도 ρ 는 2.5 g/cm³로 정하였다. 수신기는

10 m지점부터 1990 m지점까지 150개의 지표에 배치하였다. 수신기 간격은 약 13.3 m이다. 모델링은 2초 동안 수행되었는데, 이는 속도 1000 m/s의 P파가 경계 부분에서 반사되어 다시 지표에 있는 수신기로 돌아올 수 있는 최소 시간이다.

진원은 최대 주파수 15 Hz의 가우시안 1차 미분 함수를 이용하였으며, 이로부터 얻은 진원의 파형을 모델의 가운데인 1000 m지점의 표면에 수직방향 변위로 가하였다. 또한, 전술한 바와 같이 모델의 좌우 및 하부에 200 m의 감쇄대를 정하여 경계에서 반사되는 파를 최소화 하였다.

다음의 Fig. 3은 지표에 위치한 150개의 수신기에서 2초 동안 얻은 인공 파형 단면으로써 각각 수직, 수평 방향 변위를 나타낸다. 지표를 따라 전파하는 상대적으로 매우 높은 진폭의 레일리파(R)의 전파를 관찰할 수 있으며 P파(P)와는 달리 진원으로부터 거리가 멀어져도 거의 분산이 일어나지 않고 거의 일정한 진폭을 유지하는 것을 볼 수 있다. 여기서, P파를 제외한 나머지 다른 파들의 전파는 수직 및 수평 방향 변위 모두에서 레일리파의 진폭에 가려 거의 나타나지 않는다.

레일리파는 탄성파 단면에서 R로 표시하였으며, 레일리파의 속도는 다음과 같은 레일리파의 특성 방정식으로부터 구할 수 있는데,

$$\frac{V_R^6}{\beta^6} - 8 \frac{V_R^4}{\beta^4} + V_R^2 \left(\frac{24}{\beta^2} - \frac{15}{\alpha^2} \right) - 16 \left(1 - \frac{\beta^2}{\alpha^2} \right) = 0 \quad (6)$$

$0 < V_R < \beta$ 에서 위 방정식을 만족하는 단 하나의 실근이 항상

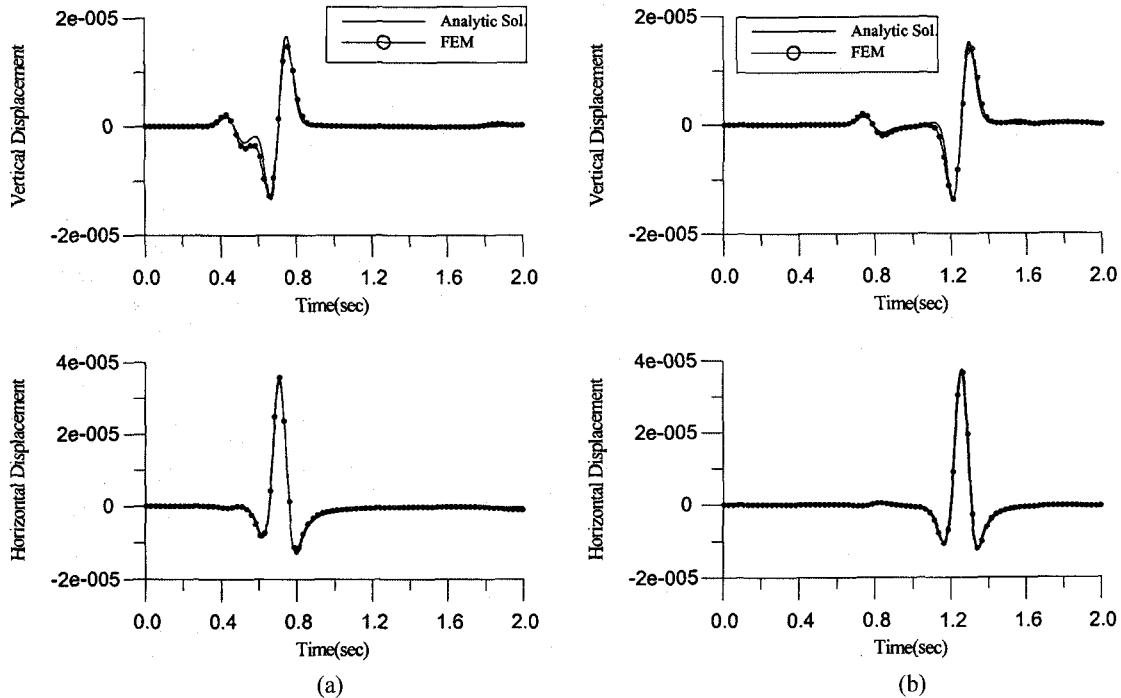


Fig. 4. The comparison of solutions to 2-D Lamb's problem at the location (a) 300 m apart from the source and (b) 600 m apart from the source: for vertical displacement (top) and horizontal displacement (bottom).

존재하므로(민경덕 외, 1987), 위 방정식에 Model I에 사용한 P파 속도($\alpha=1000$ m/s)와 S파 속도($\beta=1000$ m/s)를 대입하고 근을 구하면, 매질에서의 레일리파의 속도 548.5 m/s를 구할 수 있다. 이는 S파의 91.4%에 해당한다. 또한, Fig. 3의 탄성파 단면으로부터 기울기를 구하면 거의 동일한 레일리파의 속도를 확인 할 수 있다.

Lamb's Problem

다음은 본 연구에서 사용한 알고리즘을 이용하여 구한 결과의 타당성을 입증하기 위하여 해석해와의 비교를 시도하였다. 위의 모델 반응은 반무한 균질 매질 내에서의 탄성파 전파 문제인 Lamb의 문제와 동일하다. 2차원 Lamb의 문제의 해석해는 식 (7), (8)의 Ewing(1957)^o 구한 해에 역 푸리에 변환을 취하여 구하였다.

$$u(x, z, t) = -i \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k_x \left(2k_x^2 - \frac{\omega^2}{\beta^2} - 2vv' \right)}{\left(2k_x^2 - \frac{\omega^2}{\beta^2} \right)^2 - 4k_x^2 vv'} \cdot \frac{Z(k)}{\mu} \exp(i(\omega t - k_x x)) dk_x dx \quad (7)$$

$$w(x, z, t) = -i \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\frac{\omega^2}{\beta^2} v}{\left(2k_x^2 - \frac{\omega^2}{\beta^2} \right)^2 - 4k_x^2 vv'} \cdot \frac{Z(k)}{\mu}$$

$$\exp(i(\omega t - k_x x)) dk_x dx \quad (8)$$

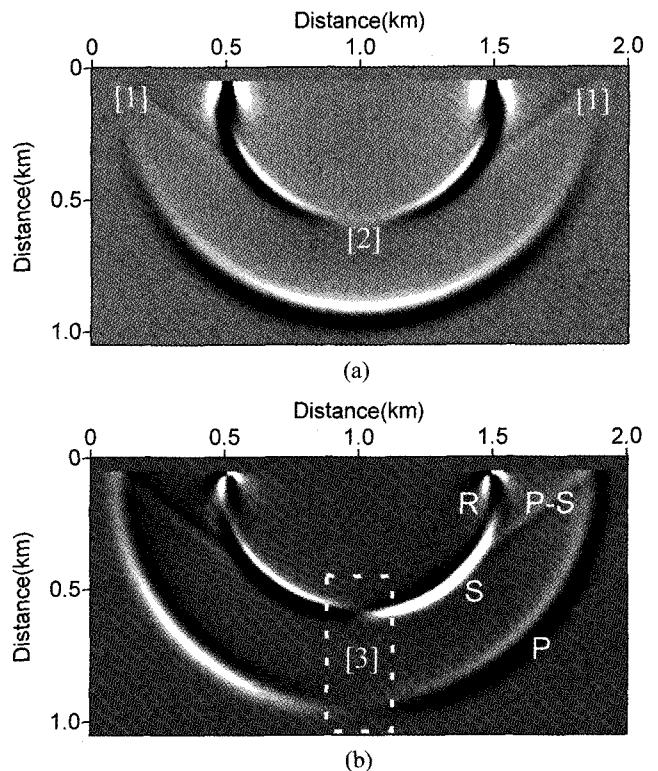


Fig. 5. The snapshots of the wavefield on Model I at 1.00 sec: (a) for vertical displacement and (b) horizontal displacement.

$$\text{여기서, } v = ik_x \sqrt{\frac{c^2}{\alpha^2} - 1}, v' = ik_x \sqrt{\frac{c^2}{\beta^2} - 1} \text{ 이다.}$$

Fig. 4는 지표상의 1000 m 지점에 진원을 가했을 때, Fig. 2에 표시한 바와 같이 진원에서 각각 300 m, 600 m 떨어진 곳에 위치한 수신기에서 얻은 수직, 수평 변위와 위 식을 이용하여 얻은 해석해를 비교한 것이다. 이로부터 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 5는 1초 후의 Model I의 내부에서의 탄성파 전파 양상을 나타내는 스냅사진이며 각각 수직 방향 및 수평 방향의 변위를 표시한다. 이를 이용하여 각 파형의 위상 및 진폭의 변화 양상을 관찰하면 각 수신기에서 수신된 파형의 균원을 분석하는데 도움을 줄 수 있다. Fig. 5의 (b)에 표시한 바와 같이 속도 1000 m/s의 P파(P)와 속도 600 m/s의 S파(S)의 전파를 확인할 수 있으며, 지표에 의해 P파에서 S파로 전이되는 파형(P-S)을 관찰할 수 있다. 또한, 지표를 따라 전파하는 높은 진폭의 레일리파(R)를 관찰할 수 있다. 자유면을 따라 전파하는 P

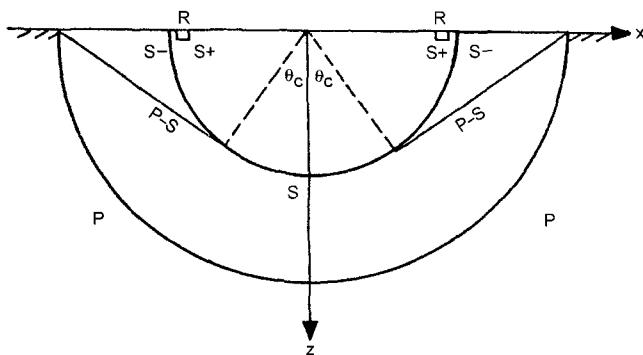


Fig. 6. Wavefront for Lamb's problem drawn by Pilant (Pilant, 1979).

파의 수직 방향 변위가 0이며([1]), P파의 경우 동심원을 따라 진원의 수직하부에서 수평 방향 변위가 0가 되고([3]), S파의 경우 진원의 수직하부에서 수평 및 수직 방향 변위가 0가 되는 것([2], [3])을 확인할 수 있으며 이는 Pilant의 파면에 대한 설명과 일치하며, 그가 해석적으로 구하여 도시한 파면도가 Fig. 6에 나타나 있다(Pilant, 1979).

Model II: 반무한 제방 모델

다음에는 불규칙한 지표 지형을 가진 경우를 모델링하기 위하여, 여러 가지 모형으로 모델링을 실시하여 보았는데, 두 번째로 채택한 모델은 Fig. 7과 같이 지표에 제방의 단면과 같은 지형을 가지고 있을 경우이며, 탄성파 전파 양상을 알아보기 위해 역시 지표 1000 m 지점에 진원을 두고 지표 10 m 지점부터 1990 m 지점까지 150개의 지표에 배치하여 모델의 반응을 관찰하였다. 수신기 간격은 수평 거리 약 13.3 m이나, 지형의 변화가 있는 부분은 실제 수신기 간격이 더 멀어지게 된다. 여러 모양을 실험한 결과 양쪽 대칭의 모델을 실험하였을 때 결과도 역시 대칭으로 나왔기 때문에 약간 비대칭의 모델을 사용하였고, Fig. 7의 제방의 상단의 좌우는 각각 진원으로부터 300 m, 400 m 떨어져 있다.

이러한 모델을 이용하여 2초 동안 모델링한 결과, Fig. 8의 인공 합성파 자료 단면을 얻었다. 이 그림들은 낮은 진폭의 파형을 강조하기 위해 최대, 최소치의 80%에 해당하는 값은 검정색, 흰색으로 도시하였다. 높은 진폭의 레일리파가 뚜렷이 나타나며, 지형에 의해 수신기 간의 거리가 멀어졌기 때문에 각 모서리에서 겹이는 왜곡된 모양이 나타난다. 또한, 지표를 따라 전파하던 레일리파가 모서리 부분에서 새로운 진원으로 작용하여 P파, 레일리파가 나오는데 이는 Fig. 9의 스냅사진으로부터 확인할 수 있다. Fig. 9는 각각 1.1초, 1.5초의 수직 및

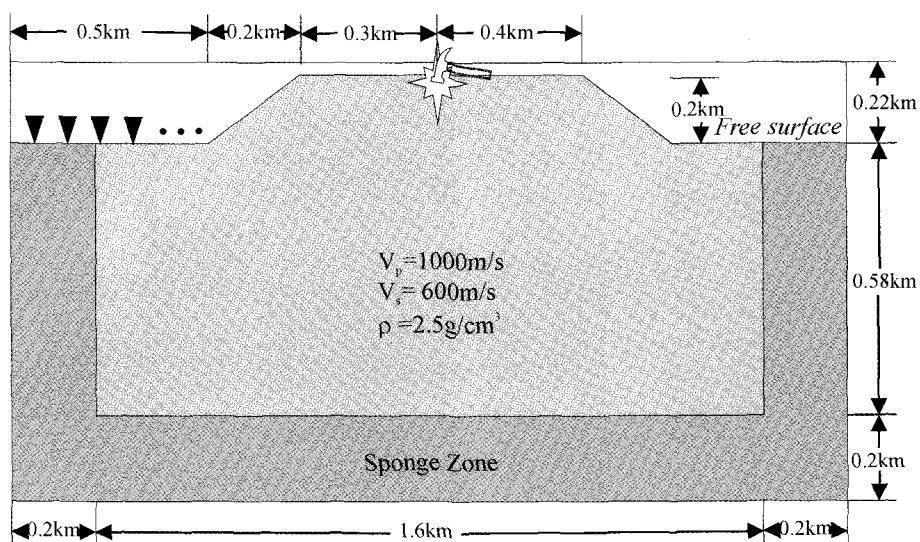


Fig. 7. Model II: Homogeneous half-space model with irregular topography (mound).

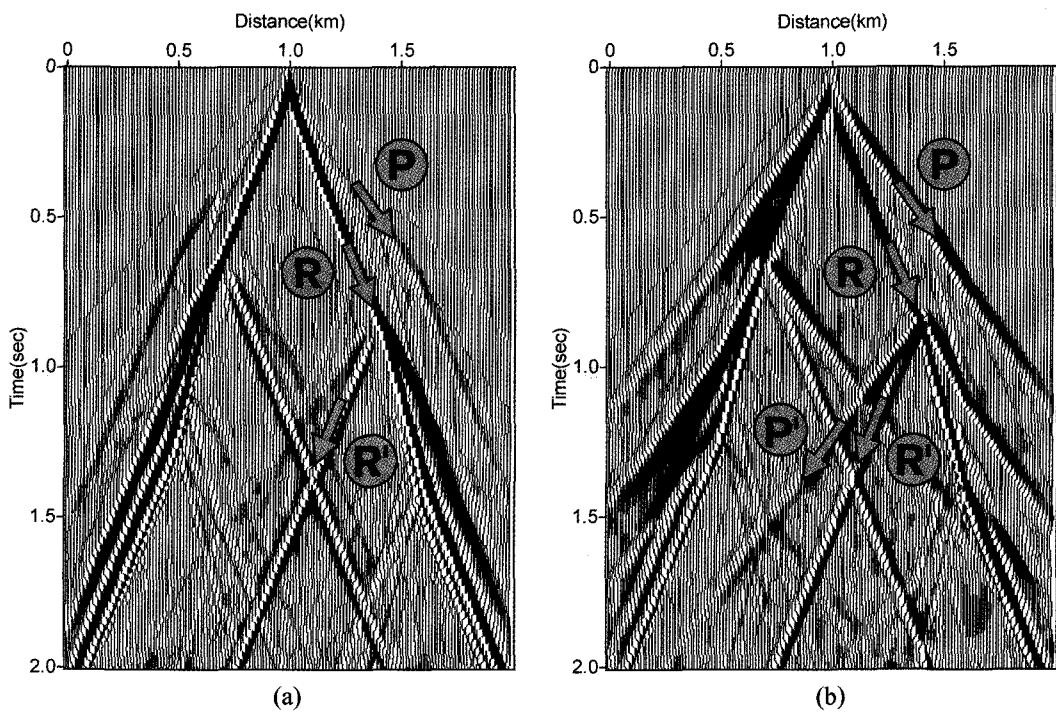


Fig. 8. The synthetic seismogram of Model II: for (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement.

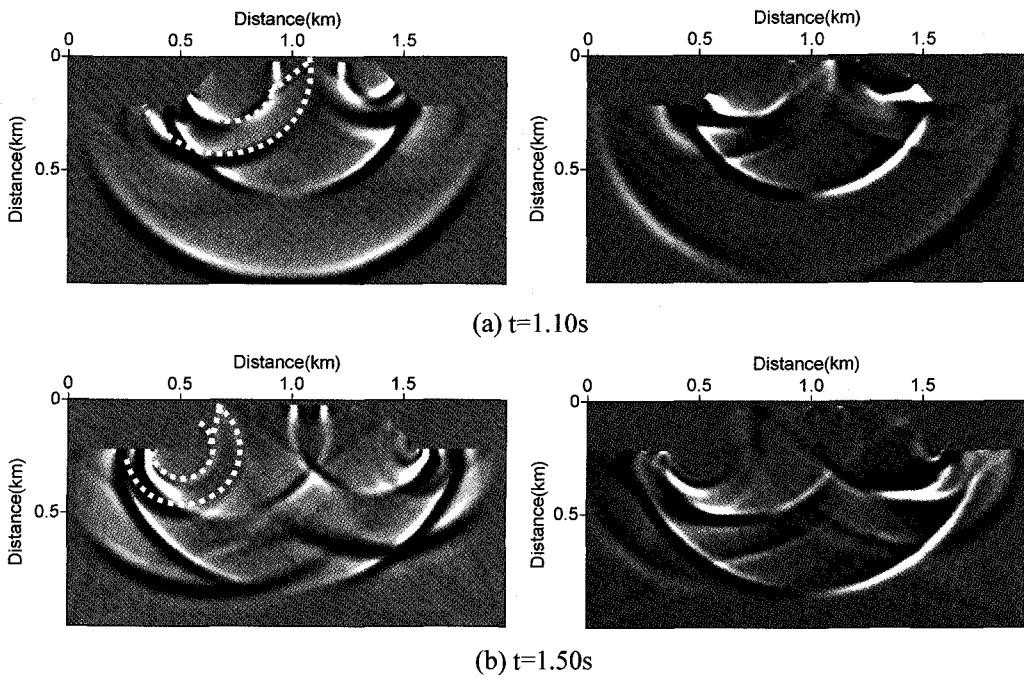


Fig. 9. The snapshots of the wavefield on model II: for vertical displacement (left) and horizontal displacement (right).

수평 변위를 나타내는 스냅사진이며, (a)의 수직 변위에 그린 파면과 같이 지표를 따라 전파하던 레일리파에 의해 새로운 P파 및 레일리파가 지표의 수신기에 기록된 것을 확인할 수 있다. 위의 Fig. 8의 (a)에서 모서리에서는 Fig. 8의 (b)와는 달리 P파가 거의 발생하지 않는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 레일

리파가 모서리에서 수직방향 진원으로 작용했기 때문으로 추측된다. 즉, 각 부분에서의 위상의 변화를 관찰함으로써 어떠한 성분이 진원으로 작용했는지 파악할 수 있다.

Model III: 반무한 채널 모델

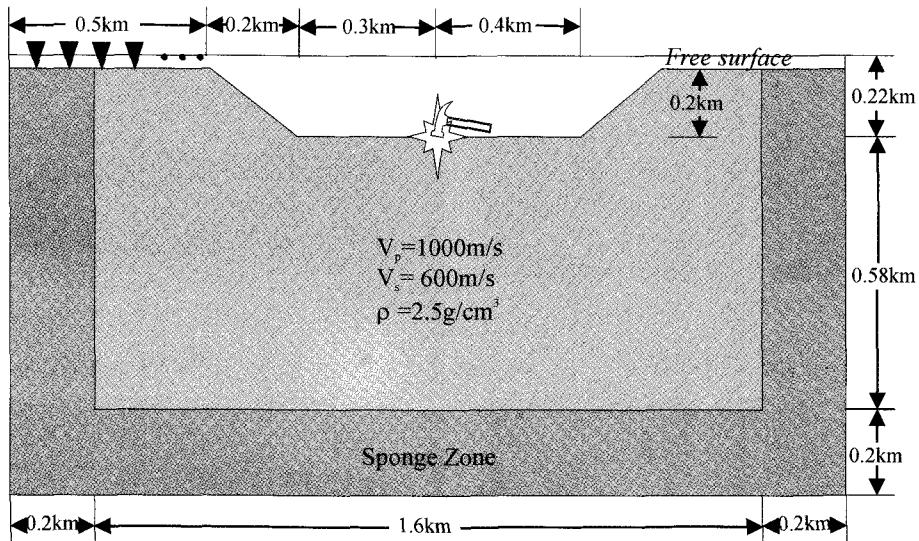


Fig. 10. Model III: Homogeneous half-space model with irregular topography (channel).

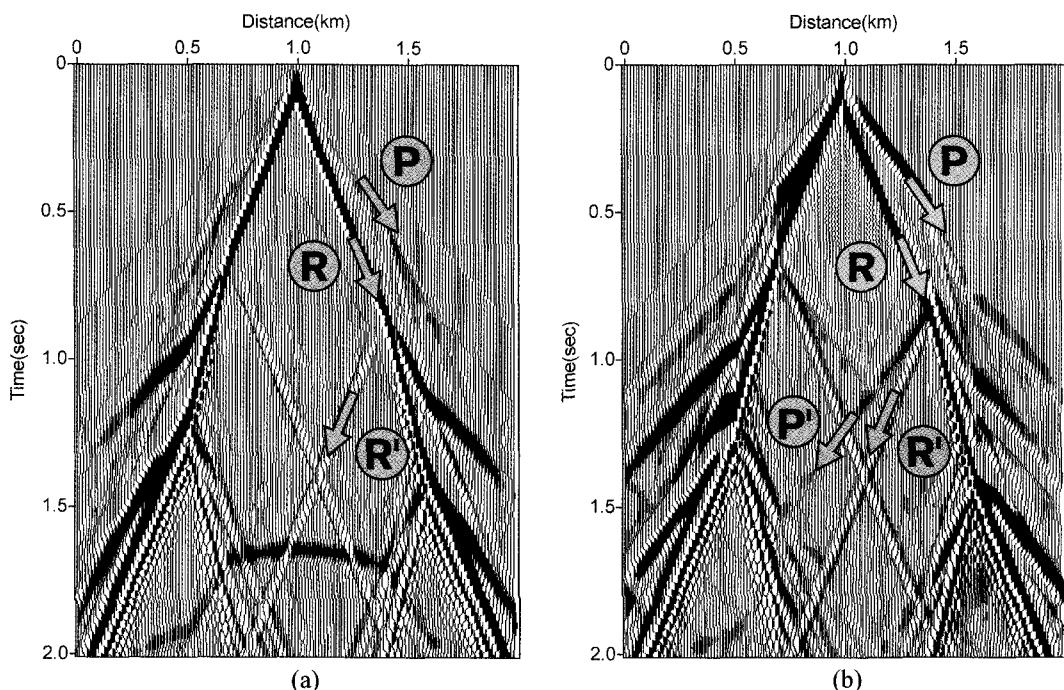


Fig. 11. The synthetic seismogram of Model III: for (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement.

세 번째 모델은 Fig. 10에 나타나 있는 바와 같이 지표의 중간에 채널이 있는 경우이며, 모델에 적용한 매개변수는 이전의 경우와 동일하다. 또한, 제방 모델과 마찬가지로 양쪽이 약간 비대칭인 모델을 사용하여 중앙의 진원에서 채널의 하단 좌우 까지의 거리가 각각 300 m, 400 m이다.

이러한 모델을 이용하여 2초간의 모델링을 실시하였으며, 지표에 위치한 150개의 수신기로부터 얻은 인공 탄성파 단면이 Fig. 11에 도시되어 있으며 Model II의 경우와 같이 각 모서리에서 레일리파가 새로운 진원으로 작용하여 새로운 P파

및 레일리파 등이 전파하는 양상을 관찰할 수 있다. 또한, 모서리에서 산란된 에너지는 Model II의 경우보다는 적었다. 그러나, Fig. 11(a)의 1.7초 근처의 중앙에 나타나는 이벤트는 진원에 의한 파가 아래쪽 경계에 반사되어 나온 것이며, 낮은 진폭을 강조하여 그렸기 때문에 뚜렷이 나타나는 것이다. Fig. 12는 1.0초 및 1.7초 후의 스냅샷으로 (a)의 수직 변위 상에 표시한 바와 같이 새로운 진원이 이루는 과면을 뚜렷이 관찰할 수 있으나, (b)에서는 여러 가지 파가 겹쳐 뚜렷하지는 않다. 결국, 파의 진행 방향에 존재하는 모서리의 기울기에 따라

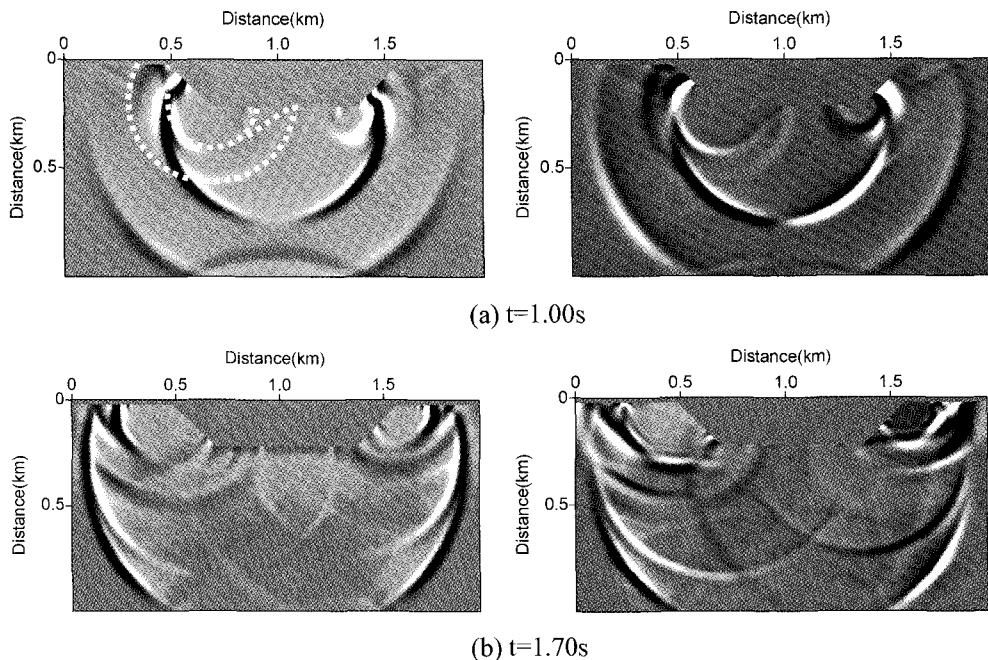


Fig. 12. The snapshots of the wavefield on Model III: for vertical displacement (left) and horizontal displacement (right).

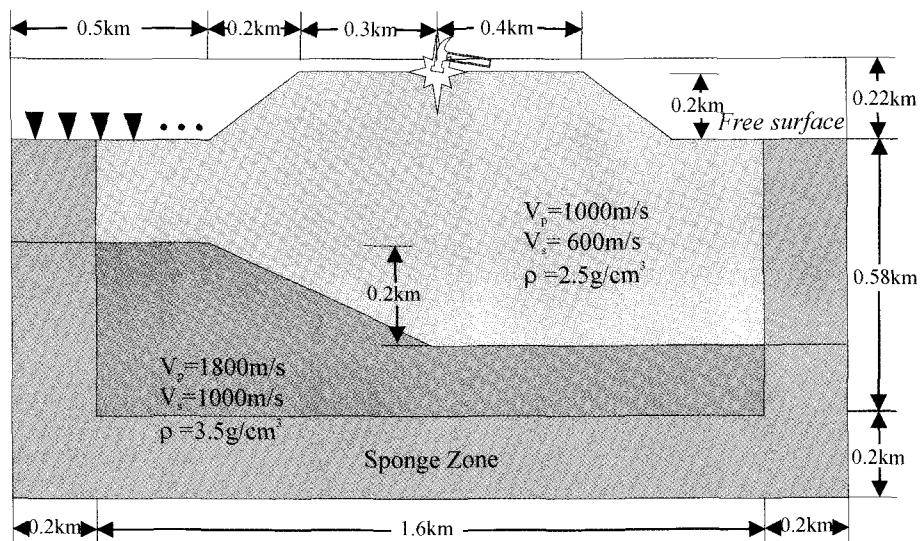


Fig. 13. Model IV: Two-layered half-space model with irregular topography (mound).

전원으로 작용하는 표면파의 에너지가 변하는 사실을 추정할 수 있으며, 이에 대해서는 더 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Model IV: 반무한 2층 모델

마지막 모델은 지표에 Model II와 같은 제방의 지형을 가지고 지하에 경사를 가진 2층 경계면을 가진 Fig. 13과 같은 모델을 사용하였다. 모델링에 사용된 1층의 매개 변수는 모델 II의 경우와 동일하며 2층에는 매질 내 P파 속도에 1800 m/sec,

S파 속도에 1000 m/sec, 그리고 매질의 밀도는 3.5 g/cm^3 을 주었다.

Fig. 14는 위의 모델에서 얻은 인공 합성파 단면이며, Fig. 15는 0.5초 간격으로 각각 수직 및 수평변위를 도시한 스냅샷이다. 단면상에서 화살표로 나타낸 바와 같이 Model II와 같이 제방이 있는 균질한 매질에 대한 인공 합성파 단면인 Fig. 8에서는 나타나지 않는 반사 이벤트를 얻을 수 있었다. 그러나, 이 조차도 새로운 진원에 의한 레일리파 등에 의해 가려 매우 구별하기 힘듬을 알 수 있다. 또한, Fig. 15에서는 진원에 의해

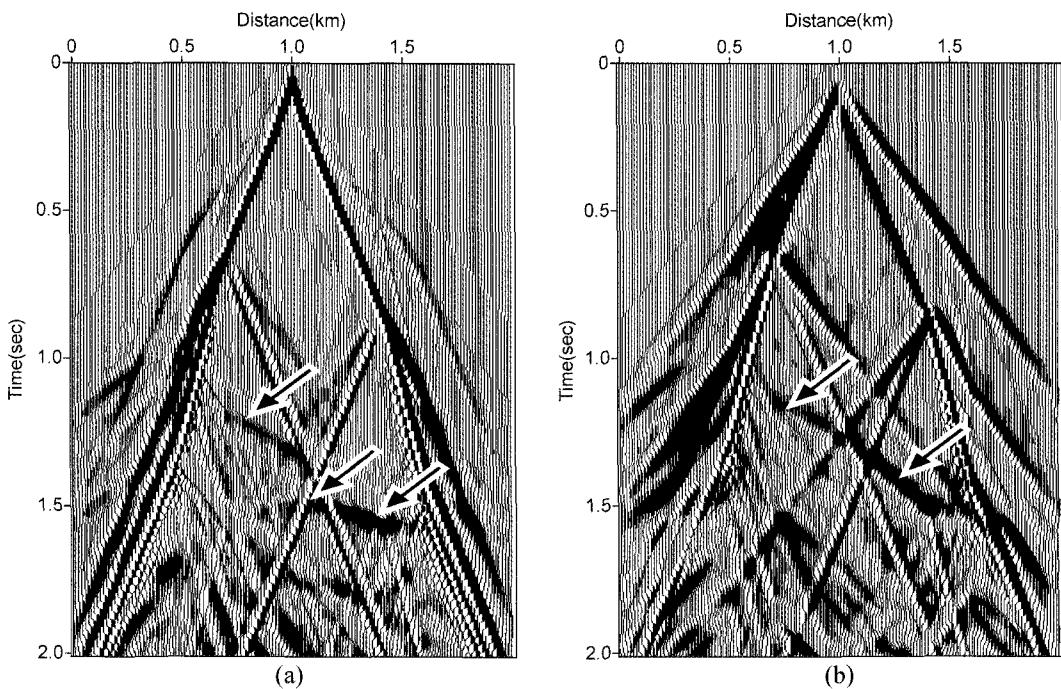


Fig. 14. The synthetic seismogram of Model IV: for (a) vertical displacement and (b) horizontal displacement.

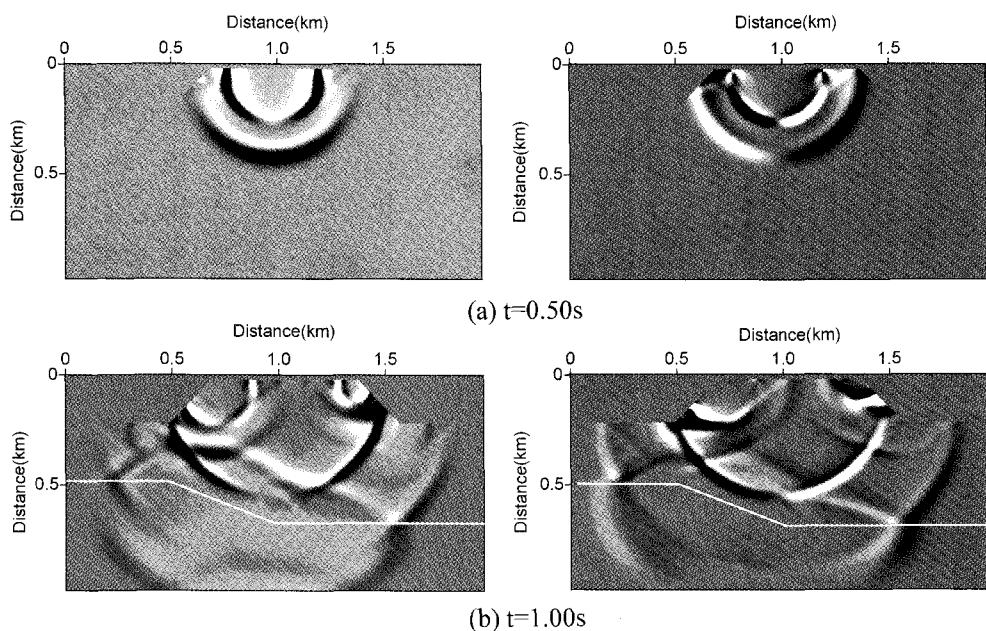


Fig. 15. A Succession of snapshots of the wavefield on model IV: for vertical displacement (left) and horizontal displacement (right).

탄성파의 전파의 복잡한 현상들이 나타나 있다.

결국, 육상 탄성파 탐사에서는 강한 표면파 등에 의해 지하 구조 해석에 필요한 자료가 크게 오염되어 정확한 해석을 어렵게 할 수 있었다. 실제 탐사에서는 이러한 요인 뿐만 아니라 지표의 저속도층, 공기파 등 다양한 요인들에 의해서 탐사 자료의 신호에 영향을 준다. 그러나, 이와 같은 불규칙 지형을 고려한 탄성파 모델링 알고리즘을 이용하고, 거리에 따라

거의 분산되지 않는 레일리파의 특성 등을 고려한다면, 보다 정확한 해석에 도움을 줄 수 있으리라 본다.

결론

본 연구에서는 지표에 지형이 존재하는 지하구조에서의 탄성파 전파특성을 규명하기 위하여 지형을 고려한 격자를 생성

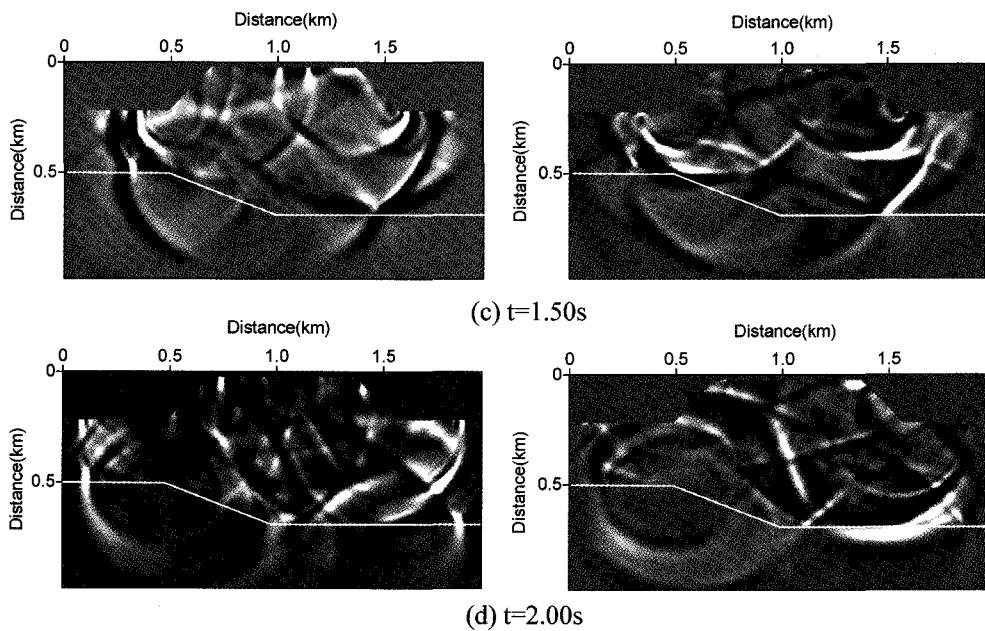


Fig. 15. Continued.

하고, 이를 이용한 시간영역 FEM 모형 반응 알고리즘을 개발하였다. 이를 통하여 다양한 모델에 대하여 모델링한 후 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 수평층의 모델링으로 얻은 결과가 Lamb의 문제의 해석 해와 일치함을 확인하였고, 반무한 탄성 매질 내의 P파, S파, 레일리파 등의 전파 특성을 고찰하였다.

2) 제방, 채널, 다층 구조 등에 대하여 합성 탄성파기록 및 snapshot을 구함으로써, 매질 내에서 전파하는 P파, S파, 레일리파 등의 굴절, 반사 및 회절 등의 현상을 관찰하여 이로부터 합성 탄성파 기록의 근원을 분석할 수 있었다.

3) 불규칙한 지표 지형이 있을 경우 표면파가 지표를 따라 전파하면서, 모서리에서 새로운 진원으로 작용하여 높은 진폭의 표면파 등을 다시 생성함으로써 자료에 해석시 반사면 등의 해석에 어려움을 줄 수 있음을 확인하였다.

앞으로 현장에서의 반사법 등의 탄성파 탐사시 위와 같은 모델링을 통하여, 지형으로 인한 표면파 등에 의한 효과를 고려하여 자료 해석을 수행한다면 좀 더 정확한 탄성파 자료 해석에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 에너지자원 기술개발사업으로 한국지질자원 연구원 기술개발사업 위탁과제의 일환으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 민경덕, 서정희, 권병두 공저, 1987, 응용지구물리학: 우성 출판사.
신창수 외, 1993, 수치모형 프로그램에 의한 인공단성파 합성 및 완전파형 역산 연구: 한국 자원 연구소.
Alterman, Z., and Karal, F. C., 1968, Propagation of elastic waves in layered media by finite difference method: *Bull. Seis. Soc. Am.*, **58**, 367-398.
Dablain, M. A., 1986, The application of high order differencing to the scalar wave equation: *Geophysics*, **51**, 54-66.
Ewing, W. M., Jardetzky, W. S., and Press, F., 1957, Elastic Waves in Layered Media: McGraw-Hill.
Kelly, K. R., Ward, R. W., Treitel, S., and Alford, R. M., 1976, Synthetic Seismogram: Finite-difference Approach: *Geophysics*, **41**, 2-27.
Lysmer, J., and Drake, L. A., 1972, A finite element method for seismology, in Bolt, B.A., Ed., Methods in computational physics, Vol. 11, Seismology: Surface Waves and Earth Oscillations: Academic Press, 181-216.
Madariaga, R., 1976, Dynamics of an expanding circular fault: *Bull. Seism. Soc. Am.*, **66**(3), 639-666.
Marfurt, K. J., 1984, Accuracy of finite-difference and finite-element modeling of the scalar and elastic wave equations: *Geophysics*, **49**, 533-549.
Pilant, W. L., 1979, Elastic waves in the earth: Elsevier Scientific.
Shin, C. S., 1995, Sponge boundary condition for frequency-domain modeling: *Geophysics*, **60**, 1870-1874.